



Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

Rec'd PCT/PTO 12 JUL 2005

PCT/IB 04 / 000 39

14.01.04

10/542132

REC'D 12 FEB 2004

WIPO

PCT

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-  
gen stimmen mit der  
ursprünglich eingereichten  
Fassung der auf dem näch-  
sten Blatt bezeichneten  
europäischen Patentanmel-  
dung überein.

The attached documents  
are exact copies of the  
European patent application  
described on the following  
page, as originally filed.

Les documents fixés à  
cette attestation sont  
conformes à la version  
initialement déposée de  
la demande de brevet  
européen spécifiée à la  
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

03100076.3

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

R C van Dijk

Best Available Copy



Anmeldung Nr:  
Application no.: 03100076.3  
Demande no:

Anmeldetag:  
Date of filing: 16.01.03  
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Philips Corporate Intellectual Property GmbH  
Habsburgerallee 11  
52064 Aachen  
ALLEMAGNE  
Koninklijke Philips Electronics N.V.  
Groenewoudseweg 1  
5621 BA Eindhoven  
PAYS-BAS

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:  
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.  
If no title is shown please refer to the description.  
Si aucun titre n'est indiqué se referer à la description.)

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischtem  
Modulationsverfahren

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)  
revendiquée(s)

Staat/~~Land~~ /State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/  
Classification internationale des brevets:

H02M/

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of  
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL  
PT SE SI SK TR LI

BESCHREIBUNG

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischtem Modulationsverfahren

Die Erfindung betrifft eine Spannungsversorgungseinheit, insbesondere zur Hochspannungsversorgung, ein Röntgengerät mit einer Spannungsversorgungseinheit und ein  
5 Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit.

Insbesondere im Hochspannungsbereich, bspw. als Spannungsversorgung für Röntgenröhren, werden Spannungsversorgungseinheiten eingesetzt, bei denen mittels einer Konverterschaltung eine Zwischenkreis-Gleichspannung in eine geschaltete Spannung  
10 umgeformt wird, bspw. in eine pulswertenmodulierte (PWM) oder pulsfrequenzmodulierte (PFM) Spannung. Mit der geschalteten Spannung wird eine resonante Schaltung gespeist, die einen Transformator aufweist. Sekundärseitig wird – ggfs. nach Gleichrichtung und/oder Durchlauf einer Vervielfacherschaltung zur  
15 Spannungserhöhung – eine Ausgangsspannung abgegriffen. Eine hierbei entstehende Ausgangsspannung kann bspw. zur Versorgung einer Röntgenröhre verwendet werden.

Bei Hochspannungsgeneratoren ist es ein Ziel der Entwicklung, kleine und kompakte Generatoren bauen zu können. Um hierfür die Schaltvorrichtung kleiner und kompakter  
20 bauen zu können, ist eine Verringerung der Schaltverluste notwendig.

In der WO 01/37416 wird ein Ansteuerverfahren für eine Spannungsversorgungseinheit vorgeschlagen, bei dem verschiedene Betriebsmodi für niedrige, mittlere und hohe Ausgangsleistungen vorgesehen sind. Die Betriebsmodi unterscheiden sich hinsichtlich der  
25 Art der Ansteuerung der Schaltvorrichtung und damit hinsichtlich der gelieferten geschalteten Spannung. In einem ersten Betriebsmodus für niedrige Ausgangsleistungen erfolgt die Ansteuerung der Schaltvorrichtung nicht-resonant (d. h. unterhalb der halben Resonanzfrequenz der Schaltung) bei im wesentlichen fester Frequenz durch Variation des Tastverhältnisses (Pulsweitenmodulation, PWM).

In einem zweiten Betriebsmodus für mittlere Ausgangsleistungen erfolgt eine Regelung der Ausgangsleistung durch Änderung der Schaltfrequenz, wobei die Schaltfrequenz aber unterhalb der halben Resonanzfrequenz bleibt.

- 5 In einem dritten Betriebsmodus für hohe Ausgangsleistungen schließlich liegt die Schaltfrequenz oberhalb der halben Resonanzfrequenz. Bei maximaler Ausgangsleistung liegt ein vollresonanter Betrieb vor. Auch hier wird die Ausgangsleistung durch Änderung der Schaltfrequenz (PFM) eingestellt.
- 10 Diese Art der Ansteuerung wird als Mixed-Mode-Modulation bezeichnet. Es hat sich herausgestellt, dass sich hierdurch insgesamt die Schaltverluste deutlich verringern lassen.
- 15 Insbesondere in Röntgen-Anwendungen werden an die Regelung der Ausgangsspannung hohe Anforderungen gestellt. So ist eine möglichst kurze Anstiegszeit und ein möglichst geringes Überspringen am Ende des Spannungshochlaufs erstrebenswert, um rasch den eingeschwungenen Zustand zu erreichen und eine unerwünscht hohe Strahlendosis für den Patienten zu vermeiden.
- 20 In der EP 1 081 839 ist ein serienresonanter Konverter, insbesondere zur Verwendung für Röntgengeräte, mit einer Regelschaltung beschrieben. Die Regelschaltung ist als digitale Regelschaltung mit einer Regelung im Zustandsraum ausgebildet. Außer der Ausgangsspannung wird als Regelgröße die Spannung über die Resonanzkapazität verarbeitet. Um eine Zerstörung von Bauelementen durch Überlastung auszuschließen,
- 25 wird diese Regelgröße einer Begrenzungsfunktion unterworfen.

Während die in der EP 1 081 839 beschriebene Regelstrategie bei herkömmlichen Schaltvorrichtungen gute Ergebnisse zeigt, ergeben sich Probleme bei stark nicht-linearen Regelstrecken. Eine mit Mixed-Mode-Modulation betriebene Spannungsversorgungseinheit stellt ein Beispiel einer solchen nicht-linearen Regelstrecke dar.

30

Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Spannungsversorgungseinheit mit einer Regeleinrichtung und ein Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit anzugeben, wobei eine gute Regelung auch bei stark nicht-linearen Verhalten erzielt werden soll. Weiter ist es Aufgabe der Erfindung, ein Röntgengerät mit einer solchermaßen geregelten Spannungsversorgungseinheit anzugeben.

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Spannungsversorgungseinheit nach Anspruch 1, ein Röntgengerät nach Anspruch 10 und ein Verfahren nach Anspruch 11. Abhängige Ansprüche beziehen sich auf vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung.

10

Die Spannungsversorgungseinheit umfasst eine Schaltvorrichtung, bspw. eine Halb- oder Vollbrücke. Hierdurch wird eine resonante Schaltung, bevorzugt mit einer Resonanzkapazität und einem Transformator, gespeist. Die Schaltvorrichtung ist steuerbar. Die Ansteuerung wird durch eine Regeleinrichtung vorgegeben.

15

Die erfindungsgemäße Regeleinrichtung ist bevorzugt als digitale Regeleinrichtung ausgebildet. Es wird mindestens eine Stellgröße berechnet. Bevorzugt wird eine skalare Stellgröße berechnet, aus der sich die Ansteuerung für die Schaltvorrichtung, d. h. Schaltfrequenz und Pulsbreite bzw. Tastverhältnis der zu erzeugenden geschalteten Spannung eindeutig ermitteln lassen.

20

Die erfindungsgemäße Regeleinrichtung verarbeitet als ersten Istwert einen Wert, der von der Ausgangsspannung abhängt. Zusätzlich kann ein zweiter Istwert verarbeitet werden, der von dem durch die Resonanzkreiselemente fließenden Strom abhängt. Bevorzugt ist dies die Spannung über einer Resonanzkapazität. Die Istwerte werden gemäß der jeweils gewählten Reglerstruktur zur Berechnung der Stellgröße verknüpft. Hierbei werden Reglerkoeffizienten verwendet, mit denen verarbeitete Größen multipliziert werden.

25

Die Besonderheit der erfindungsgemäßen Lösung liegt darin, dass einer oder mehrere, bevorzugt alle verwendeten Reglerkoeffizienten nicht konstant, sondern arbeitspunkt- abhängig veränderbar sind. Innerhalb der digitalen Regeleinrichtung können sie bspw. als Look up-Table realisiert sein, so dass sie in unterschiedlichen Betriebszuständen der  
5 Spannungsversorgungseinheit unterschiedliche Werte annehmen.

Der jeweilige Arbeitspunkt kann durch die elektrische Größe der Spannungsversorgungseinheit oder durch eine Größe der Regelung gegeben sein, oder durch eine Kombination mehrerer Größen. Bevorzugt werden solche Größen, die ein Maß für die  
10 gelieferte Leistung darstellen.

Damit eine Variation der Reglerkoeffizienten, die bspw. beim Wechsel zwischen verschiedenen Betriebsmodi bei Mixed-Mode-Modulation sehr starken Variationen unterworfen sein können, nicht zu einer unstetigen Änderung der Stellgröße führt, wird erfindungsgemäß ein differenziell arbeitender Regler vorgeschlagen. D. h., dass der Regler nicht Messwerte der Istwerte selbst verarbeitet, sondern zeitliche Änderungen derartiger Messwerte. Bei der vorgeschlagenen digitalen Regeleinrichtung werden so die Differenzen zwischen Abtastwerten zu verschiedenen, bevorzugt zu direkt aufeinanderfolgenden Abtastzeitpunkten berechnet und bei der Berechnung der Stellgröße verwendet. Das differenzielle Prinzip ermöglicht eine stetige Ausgangsgröße trotz starker  
20 Variation der Reglerparameter.

Es hat sich gezeigt, dass mit einem derartigen Regler die hohen Anforderungen an eine geregelte Hochspannungsversorgung auch für Röntgenröhren erfüllt werden können,  
25 trotz der Verwendung von Mixed-Mode-Modulation.

Bei der Regelung kann die Zwischenkreis-Spannung als konstant angenommen werden. Da diese aber, bspw. in Abhängigkeit von der Last, auch schwanken kann, wird zur Erzielung noch besserer Regeleigenschaften gemäß einer Weiterbildung der Erfindung vorgeschlagen, dass die Regeleinrichtung die Zwischenkreis-Spannung als zusätzliche  
30 Eingangsgröße verarbeitet. Innerhalb der Regeleinrichtung können dann eventuelle Abweichungen der Zwischenkreis-Spannung kompensiert werden.

Wie bereits erläutert sind bevorzugt einige oder alle Reglerkoeffizienten arbeitspunkt-  
abhängig. Sie können in entsprechenden Tabellen abgespeichert sein. Die Koeffizienten  
können berechnet werden, indem für jeden Arbeitspunkt ein vollständiger Reglerent-  
wurf durchgeführt wird. Die jeweiligen Tabellen für die arbeitspunktabhängigen Reg-  
lerkoeffizienten können ein- oder mehrdimensional sein, d. h., dass der jeweilige Reg-  
lerkoeffizient von einer oder von mehreren Größen abhängig ist. Bevorzugt werden  
zweidimensionale Look up-Tables, in denen der jeweilige Reglerkoeffizient in Abhän-  
gigkeit von einem Wertepaar aus zwei Indexgrößen angegeben ist. Bevorzugt wird hier-  
bei, dass die erste Indexgröße von der durch den Regler berechneten Stellgröße abhängt,  
und die zweite Indexgröße von einem oder mehreren der verarbeiteten Istwerte. In einer  
bevorzugten Ausführungsform wird als erste Indexgröße eine zeitverzögerte Stellgröße  
und als zweite Indexgröße eine Differenz zwischen zwei verarbeiteten Istwerten, näm-  
lich der Ausgangsspannung und der Spannung über der Resonanzkapazität verwendet.

Die bevorzugte Grundstruktur der Regeleinrichtung ist die eines differenziellen PI-  
Reglers. In einer bevorzugten Ausführungsform werden die Regelabweichung sowie  
Differenzwerte der verarbeiteten Istwerte und ein rückgekoppelter, zeitverzögerter Dif-  
ferenzwert der Stellgröße jeweils mit Reglerkoeffizienten multipliziert und aufsum-  
miert. Das Ergebnis wird wiederum zeitlich aufsummiert, um die Stellgröße zu berech-  
nen. Von den Reglerkoeffizienten sind bevorzugt alle arbeitspunktabhängig veränder-  
bar.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist eine spezielle Regelung vorgesehen, mit  
deren Hilfe die Zerstörung von Bauteilen durch Überlastung verhindert wird. Bei einem  
serienresonanten Konverter betrifft dies vor allem den Resonanzstrom, d. h. den Strom  
durch die Serienresonanzelemente. Durch Begrenzung dieses Stroms bzw. der Span-  
nung an der Resonanzkapazität kann eine Überlastung verhindert werden. Für eine der-  
artige Begrenzung enthält die Regeleinrichtung außer der ersten Reglereinheit zur Rege-  
lung der Ausgangsspannung eine zweite Reglereinheit, die eine zweite Stellgröße vor-  
gibt, um die Spannung an der Resonanzkapazität auf einen Maximalwert zu regeln. Ü-  
bersteigt die von der ersten Reglereinheit vorgegebene Stellgröße die von der zweiten

Reglereinheit vorgegebene Stellgröße, so wird die Stellgröße auf letzteren Wert limitiert.

5 Auf diese Weise wird eine dynamische Limitierung erreicht, die im normalen Betrieb nicht in die eigentliche Regelung eingreift. Nur wenn durch die erste Reglereinheit eine Stellgröße vorgegeben wird, die zu einem kritischen Betriebszustand führen könnte, erfolgt eine Limitierung. Aufgrund dieser Limitierung kann insgesamt eine schnellere Anlaufzeit erreicht werden, da die erste Reglereinheit entsprechend ausgelegt werden kann, um die Bauelemente der Spannungsversorgungseinheit näher an ihrem Leistungs-  
10 limit zu betreiben.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist die Regeleinrichtung digital ausgebildet, bspw. mittels eines DSP, der ein entsprechendes Programm ausführt. Wenn bei hohen Resonanzfrequenzen die Timing-Intervalle hierbei zu kurz sind, um alle notwendigen  
15 Berechnungen durchzuführen, kann vorgesehen werden, dass nur Messwerte eines Teils der Timing-Intervalle verarbeitet werden, bspw. die Messwerte während jedes zweiten, dritten usw. Timing-Intervalls.

Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand von Zeichnungen  
20 näher beschrieben. In den Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1 ein schematisches Schaltbild einer Hochspannungsversorgungseinheit für eine Röntgenröhre;
- Fig. 2 ein Schaltbild einer Schaltungsvorrichtung;
- 25 Fig. 3 ein Ersatzschaltbild eines resonanten Konverters;
- Fig. 4a-4c schematische Darstellung des Zeitverlaufs einer geschalteten Spannung und eines Resonanzstroms in einem ersten, zweiten und dritten Betriebsmodus;
- Fig. 5 eine Darstellung des Zeitverlaufs von Strömen und Spannungen in  
30 Fig. 3;
- Fig. 6 ein Diagramm mit der gegenseitigen Abhängigkeit der Größen  $T_w$ ,  $T_p$  und  $T_{pw}$ ;



- Fig. 7 eine schematische Darstellung einer Spannungsversorgungseinheit mit Regelung;
- Fig. 8 ein Reglerdiagramm eines PI-Reglers;
- Fig. 9 ein Reglerdiagramm eines differentiellen PI-Reglers;
- 5 Fig. 10 ein Reglerdiagramm einer Regeleinrichtung mit zwei Regeleinheiten;
- Fig. 11 ein Reglerdiagramm mit einem differentiellen PI-Regler mit arbeitspunktabhängigen Reglerkoeffizienten und Zwischenkreisspannungskompensation;
- Fig. 12 ein Reglerdiagramm einer Ausführungsform einer vollständigen Regeleinrichtung.
- 10

In Fig. 1 ist eine Spannungsversorgungseinheit 10 für eine Röntgenröhre 12 dargestellt. Eine Wechselspannungsversorgung 14 – bspw. ein Anschluss an das Spannungsversorgungsnetz – liefert nach Gleichrichtung durch eine Gleichrichter-Einheit 16 eine Zwischenkreisspannung  $U_Z$ , mit der eine Schalteinheit 18 versorgt wird. Die Schalteinheit 18 formt die Zwischenkreis-Gleichspannung  $U_Z$  um in eine geschaltete Spannung, mit der eine resonante Schaltung 20 mit einer Serienkapazität C und einem Transformator T gespeist wird. Sekundärseitig des Transformators T wird über eine an sich bekannte Vervielfacher-Schaltung 22 eine Ausgangsspannung erzeugt, mit der die Röntgenröhre 12 gespeist wird.

15

20

Fig. 2 zeigt ein Schaltbild der Schaltvorrichtung 18. Im dargestellten Beispiel handelt es sich um eine Vollbrückenschaltung, bei der mit vier gesteuerten Schaltern S1, S2, S3, S4 die Eingangsgleichspannung  $U_Z$  in eine geschaltete Ausgangsspannung  $U_{WR}$  umgeformt wird. Den Schaltern S1, S2, S3, S4 sind jeweils antiparallele Dioden D1, D2, D3, D4 zugeordnet. Der zwischen den Halbbrücken fließende Strom wird mit I bezeichnet.

25

Wie in Fig. 1 angedeutet umfasst die durch die Schalteinheit 18 gespeiste resonante Schaltung eine Serienkapazität C und einen Transformator T. Unter der Annahme einiger Vereinfachungen (Ersetzung der Vervielfacher-Schaltung 22 durch einen Brückengleichrichter 24 und einen idealen Transformator mit einem konstanten Übersetzungs-

30

verhältnis, unendlich hohe Hauptinduktivität des Transformators T, Vernachlässigung von Verlusten bei der Gleichrichtung und Vernachlässigung der parasitären Kapazität des Transformators T) sowie der Transformation aller elektrischen Größen auf die Primärseite des Transformators T, ergibt sich das in Fig. 3 dargestellte Ersatzschaltbild.

- 5 Die Spannung über die Resonanzkapazität C wird mit  $u_C$  bezeichnet. Die Streuinduktivität des Transformators T wird mit L bezeichnet, die Spannung hierüber ist  $u_L$ . Der ohmsche Verlust des Transformators T wird durch den Widerstand R repräsentiert. An dem idealen Gleichrichter 24 liegt die Wechselspannung  $u_{GR}$  an, woraus die Spannung  $u_{out}$  erzeugt wird, die eine Lastkapazität  $C_g$  und einen
- 10 Lastwiderstand  $R_L$  speist, welche die Röhre 12 repräsentieren.

Die Spannungsversorgungseinheit 10 wird mit Mixed-Mode-Modulation betrieben, wie sie in der WO 01/37416 beschrieben ist. Der Inhalt dieser Schrift wird bezüglich dieses Ansteuerverfahrens vollständig einbezogen. Bei der verwendeten Mixed-Mode-

- 15 Modulation werden drei verschiedene Betriebsmodi mit verschiedener Ansteuerung unterschieden. Diese drei Betriebsmodi sollen nachfolgend im Hinblick auf die Fig. 4a, 4b und 4c beschrieben werden:

- In einem ersten Betriebsmodus erfolgt eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung 18 so,
- 20 dass die gelieferte geschaltete Spannung  $U_{WR}$  eine pulsweitenmodulierte Spannung ist. Es wird eine geringe, feste Schaltfrequenz verwendet. Fig. 4a zeigt für diesen ersten Betriebsmodus den Verlauf des Stroms I und die Ansteuerung der Schalter S1, S2, S3, S4 anhand einer Schaltgröße S (bei  $S=1$  sind S1, S4 ein und S2, S3 aus; bei  $S=0$  sind alle Schalter aus; bei  $S=-1$  sind S2, S3 an und S1, S4 aus). Die Regelung erfolgt durch
- 25 Variation des Tastgrades. Der erste Betriebsmodus wird für niedrige Ausgangsleistung verwendet.

- Im zweiten Betriebsmodus ist der Tastgrad konstant auf dem Maximum, d. h. der halben Resonanzperiode. Die Schaltfrequenz ist zwischen der im ersten Betriebsmodus
- 30 verwendeten geringen Frequenz und der halben Resonanzfrequenz der Schaltung variabel. Fig. 4b zeigt den Stromverlauf bei dieser Ansteuerung. Mittels Pulsfrequenz-

modulation (PFM) wird die Ausgangsleistung eingestellt. Der zweite Betriebsmodus wird für mittlere Ausgangsleistungen verwendet.

Im dritten Betriebsmodus erfolgt der Betrieb der Schaltung 20 resonant. Die Schaltfrequenz ist variabel oberhalb der halben Resonanzfrequenz der Schaltung 20. Die Pulsbreite ergibt sich aus dem Nulldurchgang des Resonanzstroms. Mit dem Nulldurchgang wird der aktive Puls beendet. In Fig. 4c ist der entsprechende Zeitverlauf der elektrischen Größen dargestellt. Mittels Pulsfrequenzmodulation wird unter Ausnutzung der Resonanzüberhöhung die Ausgangsleistung eingestellt. Der dritte Betriebsmodus wird für den Betrieb bei hohen Ausgangsleistungen verwendet.

In Fig. 5 ist der Zeitverlauf der Größen  $u_c(t)$ ,  $u_{WR}$  und  $i(t)$  dargestellt. Anhand dieses Diagramms sollen einige Größen definiert werden. Ein Timing-Intervall beginnt mit einem Nulldurchgang des Stromes ("Detect Zero"-Ereignis). Nach einer Zeit  $T_W$  beginnt eine aktive Phase, in der die positive (S1, S4) oder die negative (S2, S3) Diagonale der Vollbrücke 18 aktiviert wird. Die aktive Phase dauert in einem Intervall  $T_P$  an bzw. wird durch den Stromnulldurchgang beendet. Danach werden alle Schalter abgeschaltet. Beim nächsten Nulldurchgang beginnt ein neues Timing-Intervall mit der entgegengesetzten aktiven Phase. Die Werte  $T_W$  und  $T_P$  werden durch die Regeleinrichtung vorgegeben. Zur einfacheren Handhabung werden  $T_W$  und  $T_P$  auf die (bekannte) halbe Resonanzfrequenz der resonanten Schaltung 20 normiert. Die drei Betriebsmodi können hinsichtlich  $T_W$  und  $T_P$  dann wie folgt charakterisiert werden:

Low Power:	$T_W = T_{W, \max};$	$0 < T_P < 1$
25 Medium Power:	$1 < T_W < T_{W, \max};$	$T_P = 1$
High Power:	$0 < T_W < 1;$	$T_P = 1.$

Hierdurch ist es möglich, einen skalaren Wert  $T_{PW}$  zu definieren, durch den die Werte  $T_P$  und  $T_W$  jeweils festgelegt sind. Fig. 6 zeigt die nicht-lineare Beziehung zwischen  $T_P$ ,  $T_W$  und  $T_{PW}$ .

In Fig. 7 ist in einer symbolischen Darstellung gezeigt, wie die Spannungsversorgungs-

einrichtung 10 geregelt wird. Die Spannung  $U_C$  an der Resonanzkapazität und die Ausgangsspannung  $U_{out}$  werden gemessen, abgetastet und einem Regler 30 zugeführt. Der Regler 30 gibt als Stellgröße einen Wert  $T_{PW}$  vor, der in einem Treiber 32 zunächst in die Werte  $T_W$  und  $T_P$  und dann in entsprechende Ansteuerung für die Schalter S1, S2, S3, S4 umgesetzt wird. Zusätzlich verarbeitet der Regler 30 auch abgetastete Messwerte der Zwischenkreisspannung  $U_Z$ , um eventuelle Schwankungen dieser Zwischenkreisspannung zu kompensieren.

Die Funktionsblöcke Regler 30 und Ansteuerung 32 aus Fig. 7 können ganz oder zum Teil als Software-Lösungen realisiert werden. Bevorzugt wird eine DSP-Implementation. Bei der Durchführung der Berechnungen stehen im High-Power Betriebsmodus nur geringe Zeitdauern von weniger als der Resonanzperiode zur Verfügung. Wenn die Resonanzfrequenz des geregelten Systems hoch und damit die Resonanzperiode kurz ist und diese zeitlichen Randbedingungen für die Durchführung der notwendigen Berechnungen zu knapp bemessen sind, kann eine Implementation gewählt werden, bei der nur bei jedem zweiten "Detect Zero"-Ereignis die Messungen durchgeführt werden. In der zur Verfügung stehenden Zeit werden die Messwerte digitalisiert und die Berechnungen zur Ermittlung der Stellgröße  $T_{PW}$  durchgeführt.

Die durch den DSP realisierte Reglerstruktur ist eine digitale Zustandsraum-Regelung. Fig. 12 zeigt in einem Reglerdiagramm die gesamte Struktur des Reglers 30. Bevor jedoch auf die Details der Realisierung nach Fig. 12 eingegangen wird, sollen zunächst Teile hiervon einzeln erläutert werden.

Fig. 8 zeigt zunächst die PI-Grundstruktur des verwendeten Reglers. Bearbeitet werden Istwerte  $U_{out}$  und  $U_L = U_C - U_{out}$ . Die Ausgangsspannung  $U_{out}$  soll auf einen Sollwert  $U_{soll}$  geregelt werden. Die verarbeiteten Istwerte  $U_{out}$ ,  $U_L$  werden mit Reglerkoeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$  multipliziert. Die Regelabweichung  $U_{soll} - U_{out}$  wird mit einem Reglerkoeffizient  $k_I$  multipliziert und zeitlich aufsummiert, was einer diskreten Integration entspricht. Der um eine Zeiteinheit verzögerte Wert der Stellgröße  $T_{PW, reg}$  wird multipliziert mit dem Reglerkoeffizient  $k_B$ . Die jeweils mit den Reglerkoeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,

$k_E$  multiplizierten Größen werden mit Vorzeichen wie in Fig. 8 gezeigt aufsummiert und einer Begrenzungsfunktion unterworfen, um die Stellgröße  $T_{PW, reg}$  zu bilden.

Die Reglerkoeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,  $k_E$  in Fig. 8 sind jedoch im Allgemeinen nicht konstant. Sie hängen vielmehr vom jeweiligen Arbeitspunkt der Stromversorgungseinheit ab. Als Indexgrößen für den Arbeitspunkt werden die Größe  $U_L$ , ggfs. noch bereinigt um eine Kompensation von Schwankungen der Zwischenkreisspannung  $U_Z$ , wie unten dargestellt, und die Regelgröße  $T_{PW, reg, old}$  des vorangegangenen Berechnungsintervalls verwendet.

10

Bei der Berechnung von  $T_{PW, reg}$  der Reglerstruktur aus Fig. 8 wird jeweils bei der aktuellen Berechnung ein dem derzeitigen Arbeitspunkt entsprechender Satz von Reglerkoeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,  $k_E$  verwendet. Die jeweiligen Werte für jeden dieser Koeffizienten sind in einem zweidimensionalen Look up-Table abgespeichert, wo für eine Anzahl von Wertepaaren der Indexgrößen  $U_L$  und  $T_{PW, old}$  die jeweiligen Werte für  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$  abgespeichert sind. Für einen bestimmten, aktuellen Arbeitspunkt, d. h. aktuelle Werte für  $U_L$  und  $T_{PW, old}$  wird aus diesen Look up-Tables zunächst das nächstkommende Paar dieser Indexgrößen ermittelt und dann der zugehörige, abgespeicherte Wert für den jeweiligen Reglerkoeffizienten verwendet. Alternativ zur Auswahl des nächstliegenden Paares wäre es auch möglich, den jeweiligen Wert des Reglerkoeffizienten geeignet zu interpolieren, wenn ausreichend Rechenzeit hierzu zur Verfügung steht.

20

Um die Look up-Tables mit den entsprechenden Vorgaben für die Koeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,  $k_E$  zu Index-Wertepaaren  $U_L$ ,  $T_{PW, old}$  zu füllen, ist für jeden Arbeitspunkt ein vollständiger Reglerentwurf notwendig.

25

Zur Bestimmung der Reglerparameter kann das folgende Modell verwendet werden.  $U_{out}$  und  $U_C$  sind abgetastete Zustände, welche zum Stromnulldurchgang des Resonanzstromes an jeweiligen Messgrößen abgeleitet werden. Das dynamische Verhalten dieser Größen wird durch das Zustandsmodell

30

$$\begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \end{pmatrix}_{k+1} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \end{pmatrix}_k + \mathbf{b} E(U_{L,k}, T_{PW,k})$$

beschrieben, wobei die Zustandsgröße  $U_L$  eine zusammengesetzte Größe

5

$$U_{L,k} = U_{C,k} - U_{out,k}$$

ist.  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{b}$  stellen Systemmatrizen dar, welche von Parametern der Spannungsversorgungseinheit 10 abhängen. Die nicht-lineare Funktion  $E$  hängt von der Zustandsgröße  $U_L$  und der Steuergröße  $T_{PW}$  ab. Sie ist durch die Konverterparameter und das Steuer-  
10 verfahren eindeutig festgelegt.

Zur Durchführung des Reglerentwurfes wird die nicht-lineare Funktion in einem Arbeitspunkt  $(U_{L0}, T_{PW0})$  linearisiert. Das resultierende lineare Modell wird um zwei zusätzliche Zustände erweitert. Der Zustand  $\Sigma$  stellt die Summe über die Regelabweichung dar und wird zur Modellierung des Integralanteils verwendet, während der Zustand  $T_{PWsys}$  zur Modellierung eines digitalen Delays zwischen Berechnung und Aufschaltung eines neuen Stellwertes  $T_{PW}$  dient. Dies führt auf ein erweitertes Systemmodell  
15

20

$$\begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PWsys} \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} A & 0 & b \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PWsys} \end{pmatrix}_k + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} T_{PW} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} U_{soll}$$

Nach der Methode der Polplatzierung - d.h. einem Entwurf durch Eigenwertvorgabe bzw. Polvorgabe (siehe beispielsweise O. Föllinger, "Lineare Ahtastsysteme", R. Oldenburg Verlag, 1982, Kapitel 7.6) - lassen sich die Parameter eines Zustandsreglers  
25

$$T_{PW} = -(k_L \quad k_{out} \quad k_I \quad k_e) \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PWsys} \end{pmatrix}$$

bestimmen. Es wird vorausgesetzt, dass in vorhergehenden Schritten zunächst die gewünschten dynamischen Eigenschaften des Systems wie Anstiegszeit, maximales Überspringen, usw. vorgegeben werden, und aus diesen Vorgaben korrespondierende Eigenwerte der Systemmatrix bestimmt werden. Wenn ein Überspringen des Systems gänzlich vermieden werden soll, was häufig der Fall ist, bedingt dies rein reelle Eigenwerte ohne Imaginärteil.

Der oben beschriebene Entwurf wird für alle möglichen Kombinationen von Werten  $U_{L0,1}$  bis  $U_{L0,n}$ , sowie  $T_{PW0,1}$  bis  $T_{PW0,m}$  durchgeführt. Die erhaltenen Reglerparameter werden in die verschiedene Tabellen geschrieben, die vom DSP arbeitpunktabhängig ausgewertet werden.

In dem Regler 30 wird aber die grundlegende PI-Reglerstruktur wie in Fig. 8 dargestellt nicht direkt verwendet. Sondern diese Struktur wird wie in Fig. 9 dargestellt um eine differenzielle Komponente erweitert. Hierbei werden von den Istwerten  $U_{out}$  und  $U_L$  sowie von der rückgeführten Stellgröße  $T_{PW,reg}$  nicht die Werte an sich, sondern Differenzwerte des aktuellen Abtastwertes zum vorhergehenden Abtastwert verwendet. Entsprechende Differenz-Einheiten  $\Delta$  sind in Fig. 9 zusätzlich zur Grundstruktur (Fig. 8) eingefügt. Durch die Verlegung der zeitlichen Summation  $\Sigma$  hinter den Summationspunkt wird hieraus wieder die Stellgröße  $T_{PW,reg}$  berechnet. Der Vorteil der differenziellen Struktur aus Fig. 9 gegenüber der Grundstruktur aus Fig. 8 ist, dass die arbeitpunktabhängigen Änderungen der Reglerparameter ihre Auswirkungen zunächst in der differenziellen Domäne haben. Durch die anschließende zeitliche Summation (diskrete Integration) ist eine stetige Änderung der Stellgröße  $T_{PW,reg}$  somit auch bei Änderungen der Parameter  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,  $k_E$  gewährleistet.

Fig. 10 zeigt zwei Reglereinheiten 34, 36. Die in Fig. 10 links dargestellte Reglereinheit 34 entspricht der Darstellung in Fig. 9 und dient dazu, die Ausgangsspannung  $U_{out}$  auf den Sollwert  $U_{soll}$  zu regeln.

5

Die in Fig. 10 rechts dargestellte Reglereinheit 36 weist dieselbe Struktur wie die Reglereinheit 34 auf. Allerdings sind in dem gezeigten Beispiel die Reglerparameter  $k_{L, I}$ ,  $k_{out, I}$ ,  $k_{L, I}$  und  $k_{E, I}$  hier nicht arbeitspunktabhängig (in einer alternativen Ausführungsform können auch diese Parameter arbeitspunktabhängig sein). Die Regelabweichung

10

wird gebildet aus dem Istwert der Spannung über die Resonanzkapazität  $u_C$  und einem fest eingestellten zulässigen Maximalwert  $U_{C, max}$  für diese Spannung. Der Wert  $U_{C, max}$  entspricht einem Wert für die Spannung an dieser Kapazität, bei dem Beschädigungen aufgrund einer Überlastung der Schaltung 20 ausgeschlossen sind. Die Reglereinheit 36 liefert eine Stellgröße  $\Delta T_{PW}$  (noch in der differentiellen Domäne), durch die eine

15

Ansteuerung so erfolgt, dass die Spannung  $U_C$  auf den zulässigen Maximalwert  $U_{C, max}$  geregelt wird.

Die Verknüpfung der beiden Reglereinheiten 34, 36 erfolgt über eine Begrenzungsfunktion. Die durch die linke Reglereinheit 34 gelieferte Stellgröße  $\Delta T_{PW}$  wird (nach zeitlicher Summation) für die Ansteuerung verwendet, solange sie nicht den durch die rechte Reglereinheit 36 vorgegebenen Wert übersteigt. Die Reglereinheit 36 tritt im normalen Betrieb nicht in Erscheinung. Erst wenn zu hohe Werte  $\Delta T_{PW}$  vorgegeben werden, limitiert die Reglereinheit 36  $\Delta T_{PW}$  auf den jeweils dynamisch ermittelten Maximalwert, bei dem noch ein zulässiges  $U_C$  erreicht wird.

25

Fig. 11 zeigt eine zusätzliche Erweiterung der Reglerstruktur aus Fig. 9. Hier wird ein Messwert für die Zwischenkreisspannung  $U_Z$  unter Verwendung eines zusätzlichen

Reglerkoeffizienten  $k_Z$  verarbeitet. In den Funktionsblöcken  $\frac{U_{nenn}}{U_Z}$  wird jeweils mit

einem Normierungsfaktor multipliziert, der gleich Eins ist, wenn  $U_Z$  dem Nennwert von

30

$U_{nenn}$  entspricht.



Die Reglerkoeffizienten  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_I$ ,  $k_E$ ,  $k_Z$  sind arbeitspunktabhängig. In Fig. 11 ist durch Pfeile dargestellt, wie die Look up-Tables durch die Indexgrößen  $T_{PW, reg, old}$  und  $U_L$  (normiert auf  $\frac{U_{nenn}}{U_Z}$ ) angesteuert werden.

5

Die oben im Zusammenhang mit den Fig. 8-11 erläuterten Bausteine werden zu dem in Fig. 12 dargestellten vollständigen Regler 30 zusammengefügt. In Fig. 12 links dargestellt ist ein Regler 40 für die Ausgangsspannung (vgl. Fig. 11). Rechts ist ein Regler 50 vorgesehen zur Begrenzung der Stellgröße  $T_{PW}$  auf einen Wert, der zu einem zulässigen Spannungswert  $U_C$  führt (vgl. Fig. 10 und die zugehörigen Erläuterungen).

10

Durch die Einheit 32 schließlich werden mit Hilfe der in Fig. 6 dargestellten Beziehung aus dem Wert  $T_{PW}$  die Größen  $T_w$  und  $T_p$  abgeleitet.

15 Durch Simulation und anschließende praktische Überprüfung konnte gezeigt werden, dass mit der dargestellten Reglerstruktur eine hochgenaue Regelung bei Mixed-Mode-Modulation erzielt werden kann.

20

## PATENTANSPRÜCHE

### 1. Spannungsversorgungseinheit mit

- einer Schaltvorrichtung (18) zur Umformung einer Zwischenkreisspannung ( $U_Z$ ) in eine geschaltete Spannung ( $U_{WR}$ ),
- und einer durch die geschaltete Spannung ( $U_{WR}$ ) gespeisten resonanten Schaltung (20) mit einem Transformator (T) zur Lieferung einer Ausgangsspannung,
- und mit einer Regeleinrichtung (30, 32) zur Vorgabe mindestens einer Stellgröße ( $T_{PW}$ ) für die Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18),
- wobei die Regeleinrichtung (30, 32) Abtastwerte mindestens eines ersten Istwerts ( $U_{out}$ ) verarbeitet, der von der Ausgangsspannung abhängt, und von dem aus zwei Abtastwerten ein zeitlicher Differenzwert ( $\Delta U_{out}$ ) berechnet wird,
- wobei der Differenzwert ( $\Delta U_{out}$ ) mit einem ersten Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ) multipliziert und das Ergebnis bei der Berechnung der Stellgröße ( $T_{PW}$ ) verwendet wird,
- und wobei der Wert des ersten Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit veränderbar ist.

### 2. Spannungsversorgungseinheit nach Anspruch 1, bei der

- bei der Berechnung der Stellgröße ( $T_{PW}$ ) ein zweiter Istwert ( $U_L$ ) verarbeitet wird, der von dem Strom durch die resonante Schaltung (20) abhängt,
- wobei aus Abtastwerten des zweiten Istwerts ( $U_L$ ) ein zeitlicher Differenzwert ( $\Delta U_L$ ) berechnet und mit einem zweiten Reglerkoeffizienten ( $k_L$ ) multipliziert wird,
- wobei der Wert des zweiten Reglerkoeffizienten ( $k_L$ ) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.

3. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
  - die Regeleinrichtung (30, 32) als dritten Istwert die Zwischenkreisspannung ( $U_Z$ ) verarbeitet,
- 5
  - wobei die Verarbeitung bevorzugt erfolgt, indem ein Differenzwert der Zwischenkreisspannung ( $\Delta U_Z$ ) mit einem Reglerkoeffizienten ( $k_Z$ ) multipliziert und zu anderen Größen addiert wird und das Ergebnis zeitlich aufsummiert wird,
  - wobei der Reglerkoeffizient ( $k_Z$ ) bevorzugt in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.
- 10
4. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
  - die Regeleinrichtung (30, 32) eine Struktur hat, bei der
  - die Regelabweichung, Differenzwerte ( $\Delta U_{out}$ ,  $\Delta U_L$ ) von Istwerten und ein rückgekoppelter, zeitverzögerter Differenzwert der Stellgröße ( $T_{PW}$ ) jeweils mit Reg-
  - 15 lerkoeffizienten ( $k_I$ ,  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_E$ ) multipliziert und aufaddiert werden,
  - und das Ergebnis zeitlich aufsummiert wird,
  - wobei einer, mehrere oder alle Reglerkoeffizienten ( $k_I$ ,  $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_E$ ) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar sind.
- 20
5. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
  - der oder die arbeitspunktabhängigen Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_E$ ,  $k_I$ ,  $k_Z$ ) aus zweidimensionalen Tabellen entnommen werden,
  - wobei in jeder Tabelle jeweils für Wertepaare einer ersten Indexgröße, die von der Stellgröße ( $T_{PW}$ ) abhängt,
  - 25 - und einer zweiten Indexgröße, die von einem oder mehreren der verarbeiteten Istwerte ( $U_L$ ) abhängt,
  - der jeweilige Wert des Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ,  $k_L$ ,  $k_E$ ,  $k_I$ ,  $k_Z$ ) enthalten ist.

6. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- die Regeleinrichtung (30, 32) eine skalare Stellgröße ( $T_{PW}$ ) liefert,
  - aus der eine Vorgabe für die Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) zur Erzeugung der geschalteten Spannung ( $U_{WR}$ ) berechnet wird.

7. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- in einem ersten Betriebsmodus für niedrige Ausgangsleistungen eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) erfolgt, indem bei im wesentlichen konstanter Schaltfrequenz, die mindestens um einen vorbestimmten Faktor geringer ist als die Resonanzfrequenz, die Pulsbreite verändert wird,
  - und in einem zweiten Betriebsmodus für höhere Ausgangsleistungen eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) erfolgt, bei der die Schaltfrequenz im Bereich der Resonanzfrequenz variiert.

8. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- die Regeleinrichtung (30, 32) mindestens eine erste Reglereinheit (34) und eine zweite Reglereinheit (36) umfasst,
  - wobei die erste Reglereinheit (34) eine erste Stellgröße vorgibt, um mindestens einen Istwert ( $U_{out}$ ) auf einen Sollwert ( $U_{soll}$ ) zu regeln,
  - und die zweite Reglereinheit (36) eine zweite Stellgröße vorgibt, um eine elektrische Größe der resonanten Schaltung (20) auf einen zulässigen Maximalwert zu regeln,
  - wobei jeweils die geringere der beiden Stellgrößen für die Ansteuerung verwendet wird.

9. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- die Regeleinrichtung als digitale Regeleinrichtung mit einer Zentraleinheit realisiert ist,
  - wobei Messwerte mindestens eines ersten Istwerts ( $U_{out}$ ) digitalisiert werden und
  - 5        mindestens eine Stellgröße ( $T_{PW}$ ) berechnet wird, um eine geschaltete Spannung mit einem Timing-Intervall zu liefern,
  - wobei Messwerte nur eines Teils der Timing-Intervalle verarbeitet werden.
10. Röntgengerät mit
- 10        - einem Netzteil (14, 16) zur Lieferung einer Zwischenkreisspannung ( $U_Z$ ),
  - einer Spannungsversorgungseinheit (10) nach einem der vorangehenden Ansprüche, die durch die Zwischenkreisspannung ( $U_Z$ ) versorgt wird,
  - und einer Röntgenröhre (12), die durch die Ausgangsspannung der Spannungsversorgungseinheit (10) gespeist ist.
- 15
11. Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit (10) mit einer Schaltvorrichtung (18) zur Umformung einer Zwischenkreisspannung ( $U_Z$ ) in eine geschaltete Spannung ( $U_{WR}$ ) und einer durch die geschaltete Spannung ( $U_{WR}$ ) gespeisten resonanten Schaltung (20) mit einem Transformator (T), und ggf. einer Gleichrichterschaltung, zur Lieferung einer Ausgangsspannung, bei dem zur Bildung einer
- 20        Stellgröße ( $T_{PW}$ ) zur Ansteuerung der Schaltvorrichtung
- aus Abtastwerten eines ersten Istwerts ( $U_{out}$ ) ein zeitlicher Differenzwert ( $\Delta U_{out}$ ) berechnet und mit einem ersten Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ) multipliziert wird,
  - wobei der Wert des ersten Reglerkoeffizienten ( $k_{out}$ ) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.
- 25

## ZUSAMMENFASSUNG

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischtem Modulationsverfahren

- 5 Eine Spannungsversorgungseinheit, ein Röntgengerät mit einer Spannungsversorgungseinheit und ein Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit werden erläutert. Zur Regelung auch nicht-linearer Regelstrecken, wie einer mit Mixed-Mode-Modulation betriebenen Spannungsversorgungseinheit, wird vorgeschlagen, dass die Regeleinrichtung als digitale Regeleinrichtung ausgebildet ist, die mindestens eine Stellgröße berechnet. Die Regeleinrichtung verarbeitet mindestens einen ersten Istwert
- 10  $U_{out}$ , der von der Ausgangsspannung abhängt. Aus zwei Abtastwerten des ersten Istwerts  $U_{out}$  wird ein zeitlicher Differenzwert berechnet und mit einem ersten Reglerkoeffizienten  $k_{out}$  multipliziert. Der Wert des ersten Reglerkoeffizienten ist hierbei in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit veränderbar.

15 Fig. 8

Fig. 1

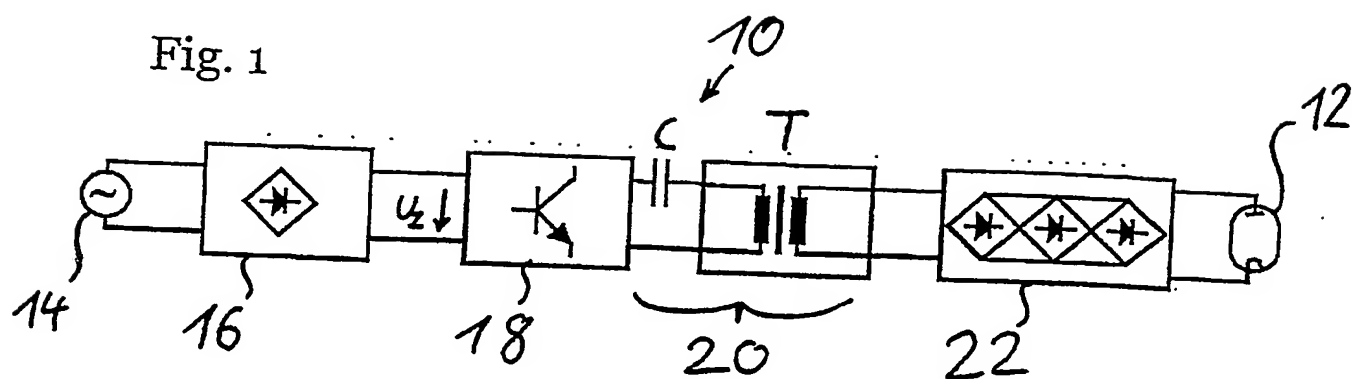


Fig. 2

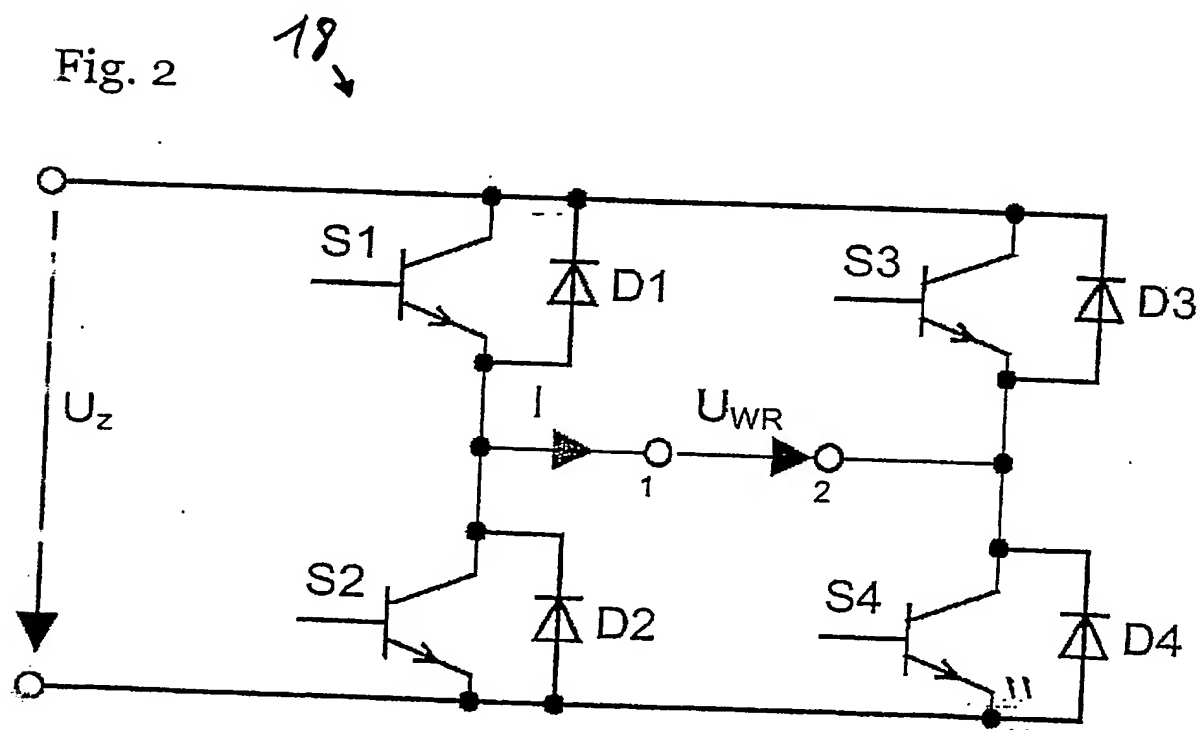


Fig. 3

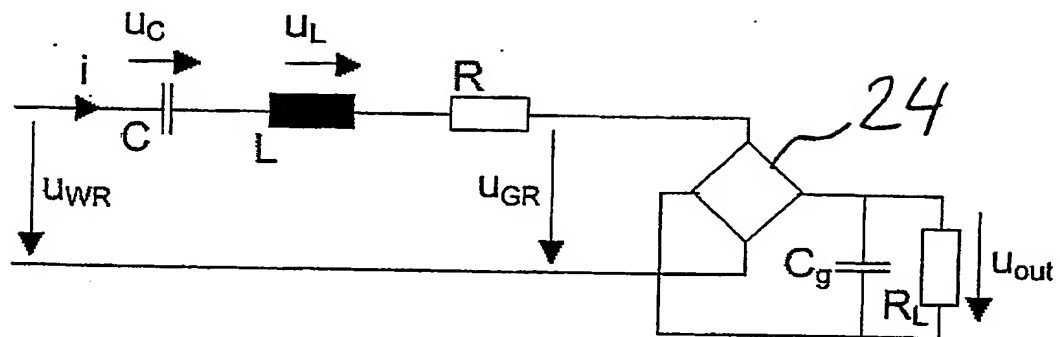


Fig. 4a

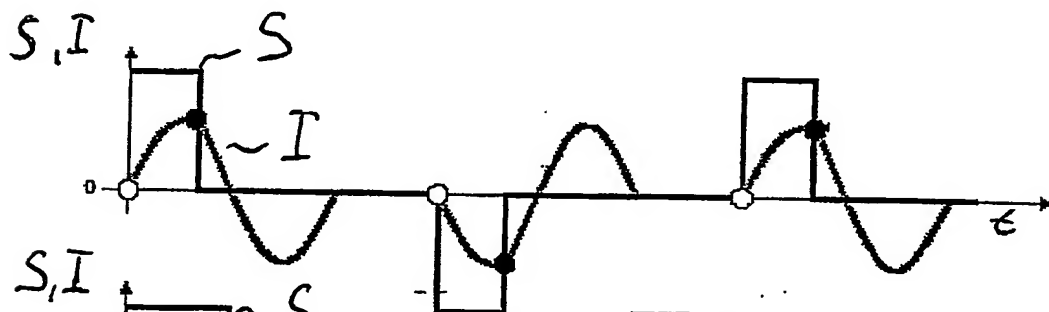


Fig. 4b

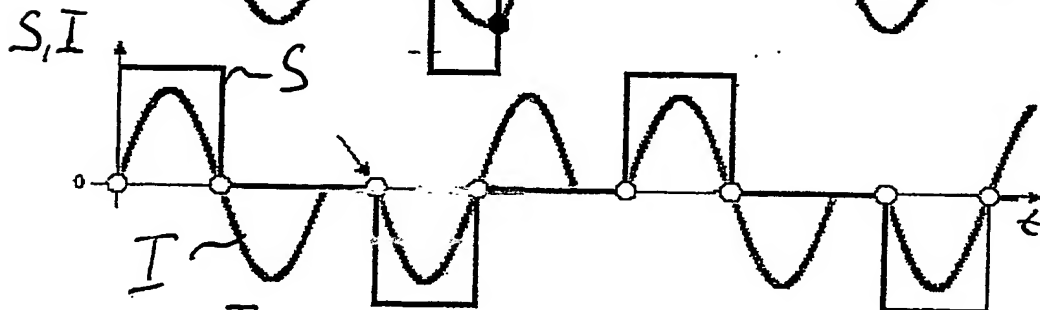


Fig. 4c

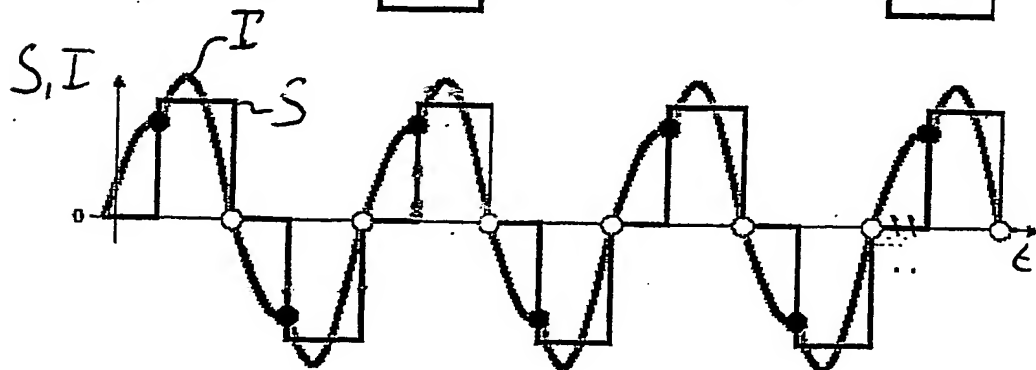




Fig. 5

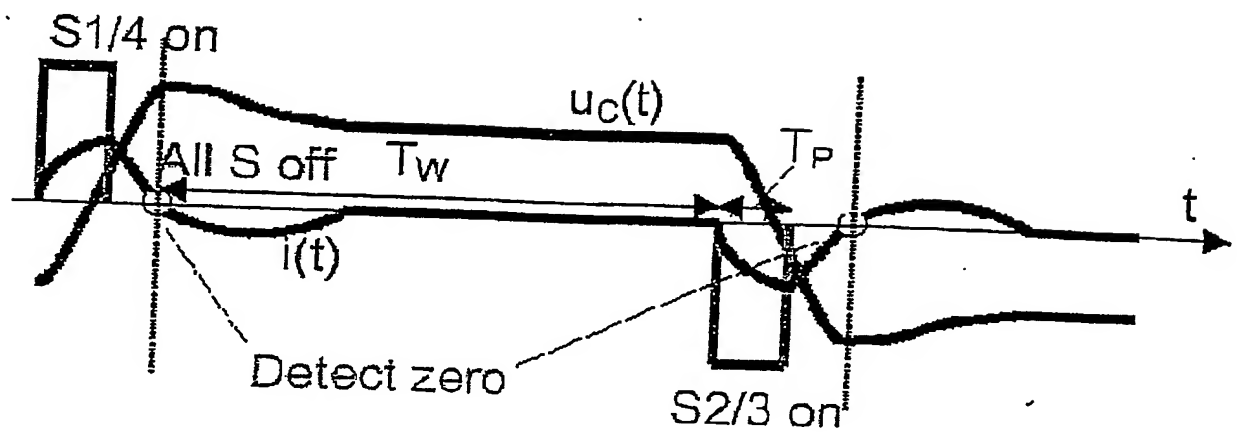


Fig. 6

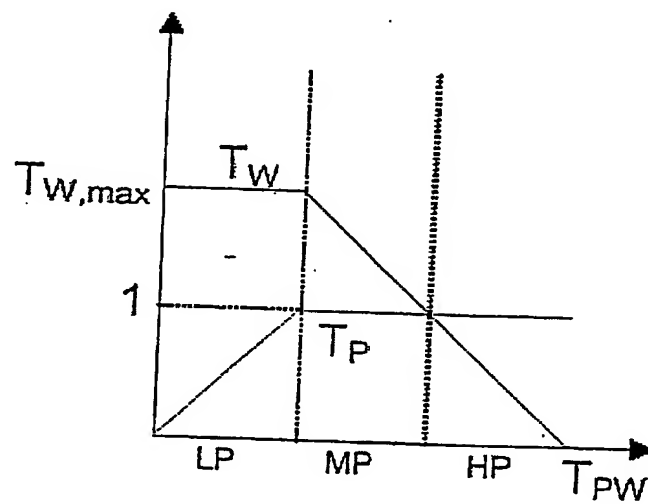
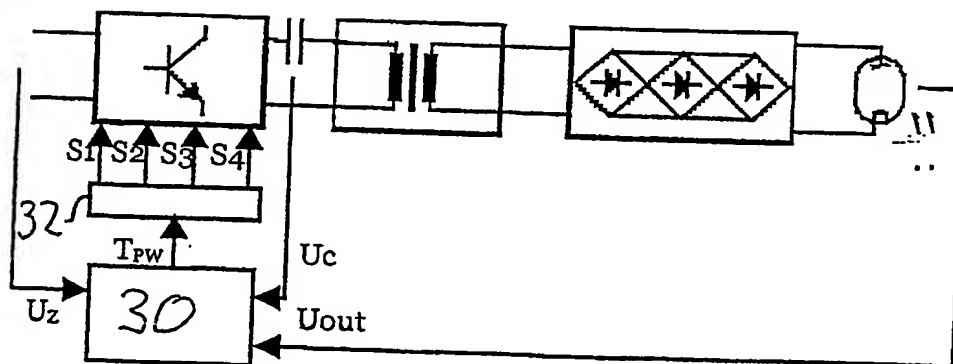


Fig. 7 10



The diagram illustrates a closed-loop control system for a power converter. The reference voltage  $U_{sol}$  is compared with the feedback signal at a summing junction. The resulting error signal is processed by a controller block (containing a gain  $K$ ) and a plant block (containing a gain  $K$ ). The output of the plant is the load voltage  $U_L = U_C - U_{out}$ . The feedback signal is derived from the output voltage  $U_{out}$  and is fed back to the summing junction. The system also includes a digital-to-analog converter (DAC) block and a delay block  $z^{-1}$ .

Fig. 10

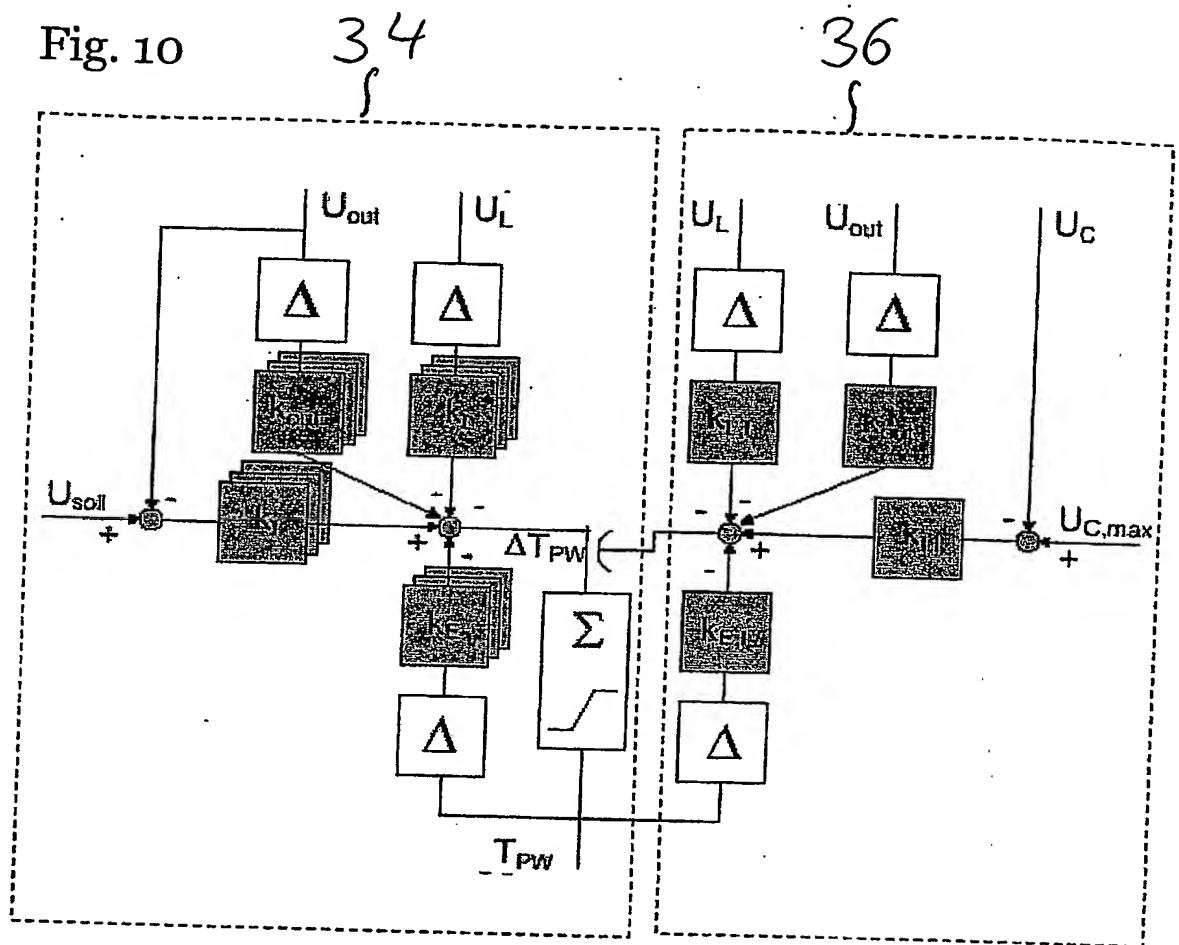


Fig. 11

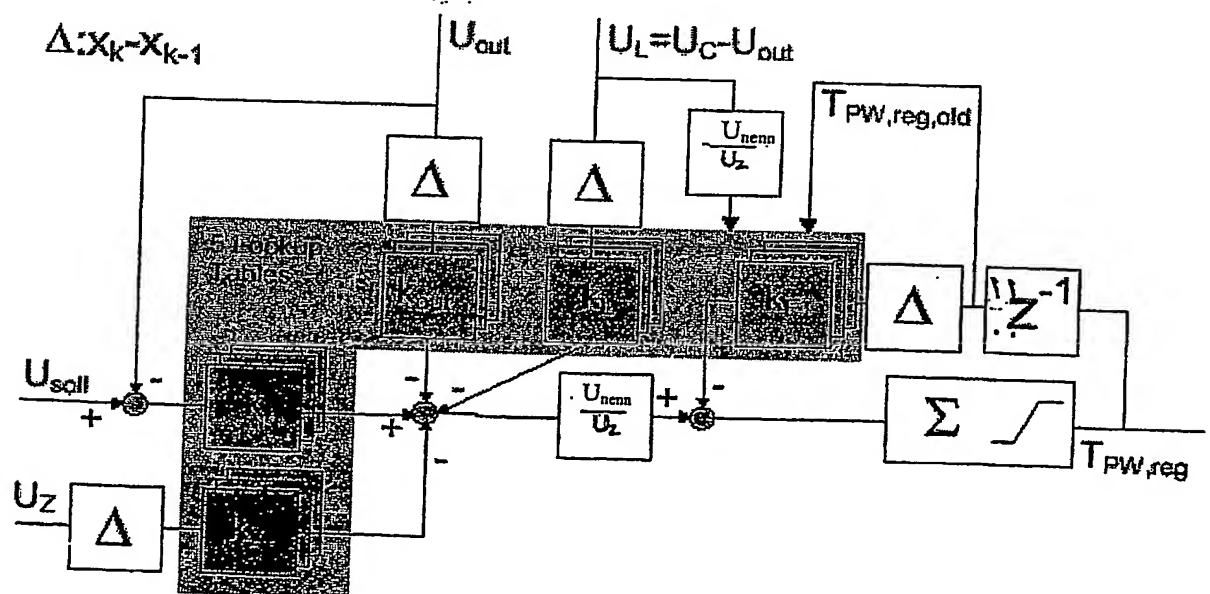
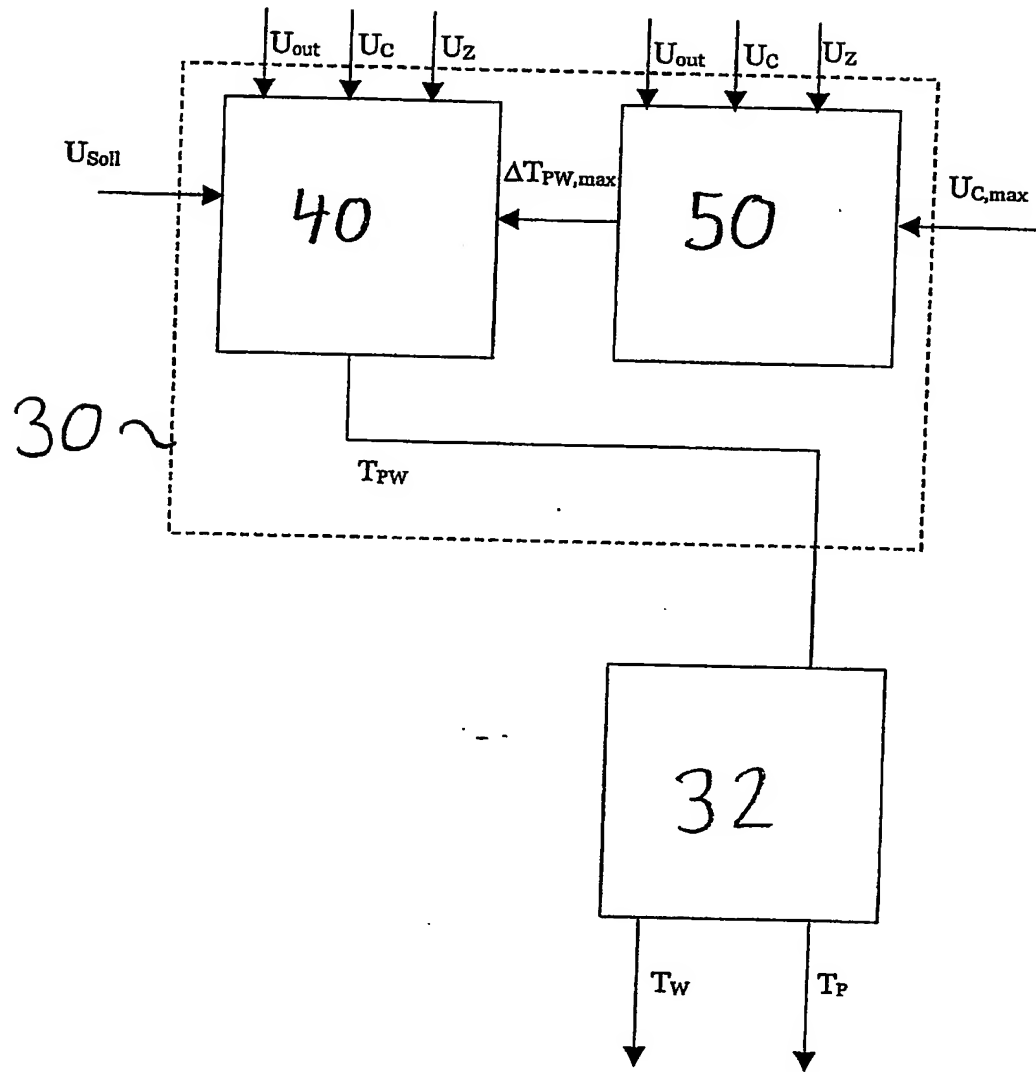
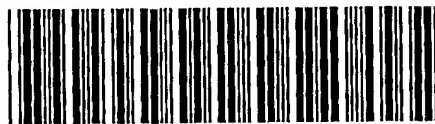


Fig. 12



PCT Application  
PCT/IB2004/000039



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☒ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☒ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKewed/SLANTED IMAGES**

☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**